

人の運動制御における先行位相の研究

著者	石田 文彦
号	250
発行年	2002
URL	http://hdl.handle.net/10097/12946

氏 名 (本籍)	いし だ ふみ ひこ 石 田 文 彦	(新 潟 県)
学 位 の 種 類	博 士 (情報科学)	
学 位 記 番 号	情 博 第 250 号	
学位授与年月日	平成 1 5 年 3 月 2 4 日	
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当	
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)システム情報科学専攻	
学位論文題目	人の運動制御における先行位相の研究	
論文審査委員	(主 査)	
	東北大学教授 中島 康治	東北大学教授 鈴木 陽一
	東北大学教授 矢野 雅文	東北工業大学教授 沢田 康次 (工学研究科)

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序論

人は時々刻々と変化する環境に実時間で対応していると考えられている。人と直接、または、人と人との間に入り相互作用し人の生活をサポートするマシンの実現にとって実時間情報処理は極めて有用であり、脳の情報処理による実時間システムの研究は重要である。

脳は感覚器より環境情報を受け、筋肉や脳内回路へ処理した情報を送り、行動や認識を行なっている。会話の時やスポーツの時など、認識や行動が環境情報を先行している場合があることを我々は日常の感覚として経験している。この先行性は環境と対応する際の脳情報処理システムの一般的特徴を表している可能性がある。従って、本研究の目的は、人の感覚－運動制御システムにおける先行性の特徴を測定し、先行性のメカニズムを解明することである。

従来の感覚－運動システム研究では、同期課題では先行運動の報告はあるが、実験から得られる情報が少なく、先行の意義について考察するには至っていない。同期課題より得られる情報の多い追従課題に関しては先行運動を示すデータは散見されるが、系統的な実験報告はされていない。また、モデル研究において、生体システムに不可避の時間遅れを補償するためのフィードフォワード制御についての研究は数多く見られるが、先行運動の積極的意義に対する提案はなされていない。そこで、本研究では、手の運動に対する目標追従課題を行い、先行運動を定量的に測定し、その意義を実験的に明らかにする。さらに、実験結果を再現しうるトップダウンモデルを構築し、先行運動のメカニズムを解明する。

第 2 章 視覚目標手動追従実験プロトコル

環境を先行する被験者の運動を測定しその意義を明らかにするべく、視覚目標手動追従実験を実施した。CRT ディスプレイ、コンピュータマウス、制御用 PC から実験装置を構成し、視覚ターゲット刺激を振幅一定の単振動運動とし、ターゲット周波数を実験条件として定常運動実験と過渡運動実験を行った。また、可能な限り多くの情報を得るために単純にフーリエ変換を行うのではなく、時々刻々のデータを直接サンプリングした後データ処理を行う解析方法を実施した。

第 3 章 視覚目標手動追従実験の結果

定常運動時の被験者の手の運動とターゲット運動との位相差に着目したところ、ある有限のターゲット周波数領域で手の運動がターゲット運動を系統的に先行することを初めて明らかにした。すなわち、ターゲット周波数が一定の場合、手の運動とターゲット運動の位相差の平均値の周波数特性は、ほとんど被験者に依らず、ターゲット周波数

$f < 0.4 \sim 0.6\text{Hz}$ の領域では平均位相差はほぼゼロで、それより高い周波数領域では位相差は正の値、つまり、被験者の先行運動を示し、 $f > 1.7 \sim 1.8\text{Hz}$ のターゲット周波数領域では負の値、つまり、ターゲット運動より遅れて追従する特徴を持つ (図 1)。先行運動領域での先行位相量は、正確には各被験者に依存することを示した。さらに、先行運動の意義を明らかにするため、ターゲット周波数が変化する過渡運動実験を行ない、先行運動時にターゲット運動変化に伴う過渡誤差が最小になることを明らかにした。すなわち、ターゲット周波数ジャンプの際に手の運動に生じる過渡的な位置誤差は周波数変化直前の位相差と相関があり、周波数変化直前の位相差が小さな正位相の範囲では、変化直後の過渡誤差は比較的小さな値をとり、負位相や大きな正位相になるにつれ大きな値になる (図 2)。かつ、周波数変化直前の位相差が定常運動時の平均位相差に等しいとき、過渡誤差は最小値をとる。各被験者によって誤差が最小になる位相差は異なるが、定常運動時の平均位相差のときに過渡誤差が最小になる特徴は変わらないことを示した (図 3)。この結果は、過去の研究では報告されていない感覚-運動制御システムの新しい特徴であり、先行制御 (Proactive control) と呼ぶことにした。

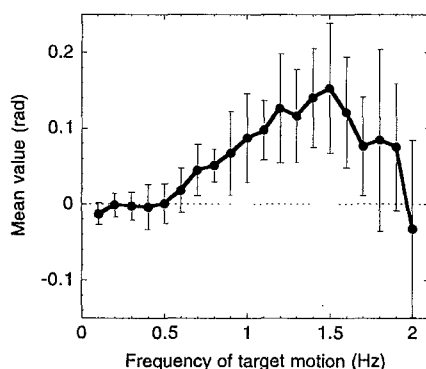


図 1: 被験者の手の運動とターゲット運動の間の位相差の平均値の周波数依存性。

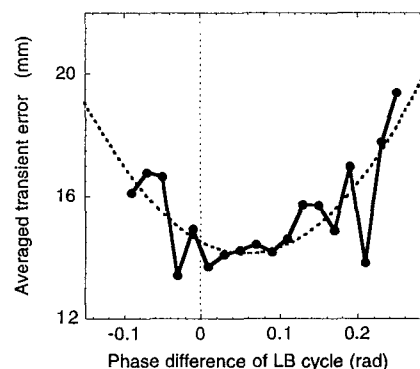


図 2: ターゲットの周波数変化直後 1 周期の過渡誤差の期待値と、変化直前半周期の平均位相差との関係 (実線)。

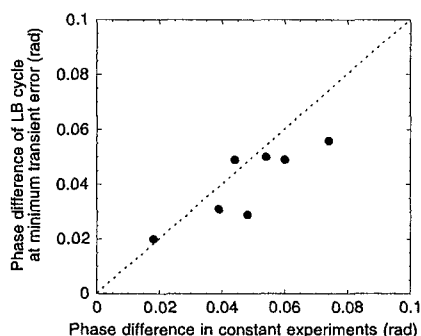


図 3: 過渡誤差の期待値を最小にする周波数変化直前の位相差と初期周波数で定常運動するときの平均位相差との相関

定常運動時のターゲット運動に対する手の運動の誤差のパワースペクトルは指数-3~2 のべき則となり、手の運動に含まれる揺らぎはなんらかの時間相関を持つことを示した。また、ターゲット周波数が $f < \sim 0.6\text{Hz}$ の領域では、手の運動はターゲット運動に対し平均的にゼロ位相で追従し position matching 制御し、 $f > \sim 0.6\text{Hz}$ の領域では、rhythm matching 制御によって先行位相動作をしている可能性を示し、臨界周波数 $f_0 = 0.6\text{Hz}$ 以下の位相差の揺らぎは $\Delta\psi \propto (f_0 - f)^{1/2}$ の特徴を持つことを明らかにした。

第 4 章 視覚目標追従時の手動運動解析モデル

人の先行制御 (proactive control) メカニズムを明らかにするため、先行制御のトップダウン的マクロモデルとして、追従運動に重要である誤差フィードバック項とターゲット速度をフィードフォワード項とする時間遅れを含む線形微

分方程式 (Delayed FeedForward モデル) を導入した。Delayed FeedForward モデルのフィードフォワード項の結合強度パラメータを適切に選択することにより、実験で観測された定常運動時の先行位相、および、過渡運動時のターゲット周波数変化直前の位相差と変化直後の過渡誤差の相関、つまり、変化直前のある先行位相値のとき過渡誤差は最小になり、その先行位相値は定常運動時の平均位相差と一致する特徴をほぼ再現できることを示した。

手の運動の揺らぎが外部ノイズによるものではなく、制御システム自体の揺らぎであることを明らかにした。すなわち、Delayed FeedForward モデルにおいてターゲット速度情報のフィードフォワード項の結合強度に揺らぎを与えると、第3章の結果と同様の指数約-3 のべき則的パワースペクトルが得られることを示した。また、心理物理実験で観測された低周波域での手の運動の揺らぎは感覚-運動制御システムの位相不安定性に起因している可能性があることを示した。すなわち、Delayed FeedForward モデルから導出した位相モデルにおいて、臨界周波数 f_0 で Hopf 分岐を起こすことを解析または数値実験で明らかにし、臨界周波数 f_0 以下の周波数では手の運動は位相不安定性を示し、 f_0 以上の周波数ではその不安定性は消失し、臨界周波数以下の手の運動の揺らぎは、心理物理実験と同様に $\Delta\psi \propto (f_0 - f)^{1/2}$ の特徴を持つことを示した。

第5章 先行制御に関する考察

第3章および第4章に示される本研究の結果の位置付けを行った。すなわち、本研究で明らかにされた先行制御は感覚-運動制御システムの新しい知見であり、人や動物などの感覚-運動制御システムが遅い時定数をもつが故の弱点を克服するため自然選択の過程でそのメカニズムを獲得したものと考察した。過去の研究で先行運動が観測されなかったのは、実験装置に依存する手の把持物体のダイナミクスに起因することを明らかにした。すなわち、Delayed FeedForward モデルにおいて、手の運動ダイナミクスの時定数を大きくすると、先行位相量が減少することを示した。

第6章 総括

本研究では、視覚目標手動追従運動において、ある有限範囲のターゲット周波数でのターゲット運動に対する被験者の手動運動の先行位相を初めて観測した。かつ、その平均先行位相量がターゲット運動が変化した際に生じる過渡誤差を最小にする最適な位相量に一致することを示し、先行位相の意義を実験的に明らかにした。このような自らの運動系を先行させ、将来生じるであろう過渡誤差を最小にする制御を先行制御 (Proactive control) と名づけた。先行制御は、人など動物の環境の変化に比べ遅い感覚-運動制御システムに関連した弱点を克服するためのものであり、生存のため自然選択の過程で獲得されてきたものと考えられる。

また、時間遅れを含む誤差フィードバック項とターゲット速度フィードフォワード項から構成されるモデルの数値計算により、モデルの唯一の可変パラメータであるフィードフォワードパラメータを適切に調節することで、実験で観測した先行制御の特徴を定量的に再現できることを示した。このことは、人の感覚-運動制御システムの一般的特徴の可能性があり、生体の情報処理を解明するための重要な切り口のひとつと考える。

論文審査の結果の要旨

人の感覚－運動制御システムの予測機能は刻々と変化する環境との実時間対応のために重要であり、予測の結果としてシステムが環境を先行する例などが報告されている。この予測機構についてはいくつかのモデルや生理学的考察がなされているが、予測能力の定量性や先行運動の意義についての研究は進んでいなかった。著者は、この問題に対し視覚目標追従運動を対象として取りくみ、初めて系統的な先行運動を観測し、先行運動の意義を定量的に明らかにするとともに、そのメカニズムを解明するための研究を行った。本論文はその結果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、本研究で行う視覚目標手動追従運動実験について述べている。視覚ターゲット運動として水平方向の単振動を用い、各標本点で位相差を測定する新しい手法について述べている。

第3章では、視覚目標手動追従運動実験の結果について述べている。ターゲット周波数が、0.6Hz 以上 1.7Hz 以下の領域において、被験者の運動がターゲット運動に先行することを統計的に示している。また、先行位相量の平均値がターゲット運動の変化に伴う過渡誤差を最小にする最適な位相量に一致することを示し、先行運動の意義を実験的に明らかにしている。これらの結果は、感覚－運動制御システムの新しい知見であり、高く評価できる。

第4章では、目標追従時の手動運動の解析モデルについて述べている。提案したモデルは、時間遅れを含む位置誤差フィードバック項とターゲット速度フィードフォワード項から構成されている。フィードフォワード項の係数を適切に選択することにより、実験結果を再現できることを示し、人の感覚－運動制御システムの基本的特徴を表わすモデルの性質を明らかにしたことは評価できる。

第5章では、実験結果の意義付けについて論じている。本研究で明らかにされた感覚－運動システムの先行制御は、人など動物の感覚－運動制御システムが環境の時間変化と比べて遅い時定数をもつことに起因する弱点を克服するために獲得されたと考察しており、人の運動制御研究に極めて有用な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、健常人に対する視覚目標手動追従運動実験により被験者の先行運動を初めて系統的に観測し、その意義を明らかにし、人の感覚－運動制御システムの実態とメカニズムについての理解を深めたもので、脳科学およびシステム情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。